

経路生成レギュレータによる進入角度を考慮した 四輪車両の溝横断走行

その他（別言語等） のタイトル	Ditches crossing considering approach angles for car-like robots by Path-generating regulator
著者	平岡 圭介, 花島 直彦, 吉田 英樹, 藤平 祥孝, 水 上 雅人
雑誌名	室蘭工業大学紀要
巻	66
ページ	17-27
発行年	2017-03-24
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009178

経路生成レギュレータによる 進入角度を考慮した四輪車両の溝横断走行

平岡 圭介^{*1}, 花島 直彦^{*2}, 吉田 英樹^{*3}, 藤平 祥孝^{*2}, 水上 雅人^{*2}

Ditches crossing considering approach angles for car-like robots by Path-generating regulator

Keisuke HIRAOKA^{*1}, Naohiko HANAJIMA^{*2},
Hideki YOSHIDA^{*3}, Yoshinori FUJIHIRA^{*2} and Masato MIZUKAMI^{*2}

(原稿受付日 平成 28 年 11 月 10 日 論文受理日 平成 29 年 2 月 10 日)

Abstract

In the uneven terrain such as landfill, there are drainage ditches for draining rainwater. Width and depth of the ditch considerably varies depending on position in it. Therefore, it is important to choose appropriate position and approach angle toward the ditch for the car-like robot to traverse the ditch without slip or stuck. We have proposed a navigation method in which the car-like robot follows the straight line across the ditch to realize the appropriate position and approach angle using the path-generating regulator functionality. In this paper, we applied the method to an autonomous all-terrain vehicle and discussed the experimental results. We found out the following results. At the moment that the robot started to follow the straight line, if the magnitude of the attitude angle error to a target value was small, it was able to track the straight line before reaching the ditch. If not, it tended to be difficult to reach the ditch before reaching. We made some proposal for improvement about this issue as well.

Keywords : Path-generating regulator, ditches, approach angles, car-like robot, traverse

1 はじめに

世界各地で広範囲な土地におけるフィールド調査が行われている。これを人の力で行うと多大な労力

*1 室蘭工業大学 生産システム工学系専攻
*2 室蘭工業大学 もの創造系領域
*3 室蘭工業大学 くらし環境系領域

や時間がかかってしまうため、自律走行車両を応用する研究がされている。

我々が対象としているフィールドには雨水を排水するための排水溝が点在しており、溝の幅や深さは場所によっては様々である。それゆえに、このような溝の通過の際にはスリップや立ち往生することなく溝を通過するために適切な通過位置や進入角度で車両を誘導する必要がある。もし、このような誘導法が開発されれば、他の不整地走行車両にも活用できると考えられる。

経路生成レギュレータ（以下、PGR）は目標経路関数群を設定し、それに属する関数の接線方向に車両の向きを漸近させることを原理とする^[1]。この手法は、特異点(車両が拘束される点)を通らなければ、どんな状態からでも原点へ収束できる利点があり、**chained form** による非ホロノミックシステムの制御法に必要な変数変換が不要であることやリアプノフ関数による安定性解析などの特徴がある。文献[2]では、PGR の四輪車両への拡張が行われ、文献[3]では四輪車両の直線経路追従問題への拡張が行われている。また、文献[4]では、溝や段差などの直線形状の障害物回避を目的とした PGR に関する研究も行われている。

文献[5]では、四輪車両が PGR による原点収束制御中に、溝を通過する問題を取り扱い、溝に接近し通過する過程で、指定の進入角度にて直線走行する方法を採用し、この区間を直線経路追従 PGR にて誘導する方法を提案した。さらに、シミュレーション結果を示し、走行軌跡の検証を行った。

本研究では文献[5]で提案された溝横断手法を実機に適用し、得られた走行軌跡とシミュレーション結果と比較することにより、実環境下における影響や制御則の有効性を検証する。

2 経路生成レギュレータ

ここでは文献[5]で提案した手法について詳細に説明する。

2.1 四輪車両の数式モデル^[2]

本研究では、四輪車両型移動ロボットを使用するため、拡張のために提案されたモデルとそのモデルにおける運動方程式についての説明を行う。

PGR は非ホロノミック車両の制御のため、車輪が横滑りしないと考える。そのため車軸と垂直方向の速度を 0 とすると、四輪車両のモデルは図 1 と表せる。また、左右のタイヤ特性に差がないと仮定すると左右の車輪は車両の前後軸と車軸との交点にそれぞれ集中していると考えられる。そのため、四輪車両は図 2 のような二輪車両モデルとして考えることができる。

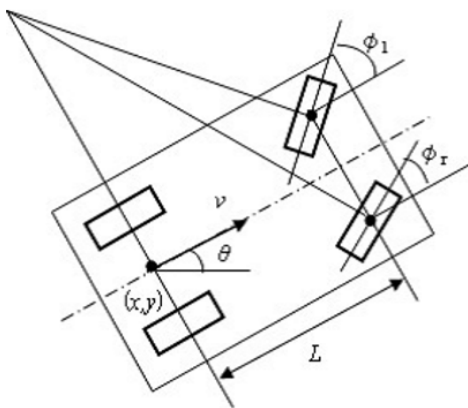


図 1 四輪車両モデル

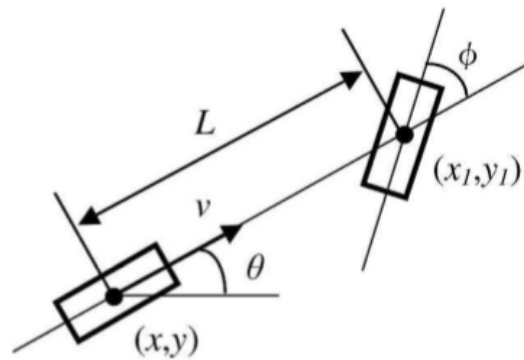


図 2 四輪車両モデルの二輪等価モデル

図 2 における四輪車両モデルの運動方程式は次式のように示す。

$$\dot{x} = u_1 \cos \theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\dot{y} = u_1 \sin \theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\dot{\theta} = \frac{\tan u_2}{L} u_1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、後輪車軸中心を (x, y) 、前輪車軸中心を (x_1, y_1) 、ホイールベースを L 、 x 軸と車両の前後軸のなす角を θ 、操舵角を Φ 、前後方向の速度を v とする。操作量として速度 v と操舵角 Φ を用い、 $u_1 = v$ 、 $u_2 = \Phi$ とする。速度 v は操作量であるため $-\pi/2 \leq u_2 \leq \pi/2$ の制限を受ける。また、 $u_1=0$ の場合に $\dot{x} = \dot{y} = \dot{\theta} = 0$ となり、車両は平衡状態になる。

2.2 経路生成レギュレータの指令値^[1]

ここでは、ある位置 (x, y, θ) から原点 $(0, 0, 0)$ に整定されるレギュレータ問題を考える。PGR の制御則は車両の姿勢角を目標姿勢角に漸近させる制御則である。よって、目標姿勢角 θ_r と車両姿勢角 θ の偏差を δ とすると次式が成り立つ。

$$\delta = \theta - \theta_r \quad \dots\dots\dots (4)$$

そして、偏差 δ を 0 に収束させるために、操舵角指令値は u_2 で表される。

$$u_2 = \tan^{-1} \left[\frac{L}{u_1} \left\{ -\lambda(\theta - \theta_r) + \frac{\partial \theta_r}{\partial x} u_1 \cos \theta + \frac{\partial \theta_r}{\partial y} u_1 \sin \theta \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $\lambda > 0$ である。また、以上の条件下では次式を求めることができる。

$$\dot{\delta} = -\lambda \delta \quad (u_1 \neq 0) \quad \dots\dots\dots (6)$$

これより δ は 0 に収束することがわかる。

次に、原点 $((x, y, \delta)=(0, 0, 0))$ が漸近安定となるような車速指令値 u_1 を説明する。次のようにリアプノフ関数の候補をおく。

$$V = \frac{1}{2}(\delta^2 + \lambda_1 x^2 + \lambda_2 y^2) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $\lambda_1, \lambda_2 > 0$ である。式(7)を時間微分し、 u_1 でまとめると、車速指令値は次式で表される。

$$u_1 = -\lambda_1 x \cos \theta - \lambda_2 y \sin \theta \quad \dots\dots\dots (8)$$

2.3 大域的な原点収束の目標姿勢角^[2]

原点収束の経路関数群は文献[2]の実験により原点収束が確認されている次式の 2 次関数群を用いる。この 2 次関数群は大域的な経路関数群とする。

$$y = kx^2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 k は任意の定数とする。また、車両の位置を (x, y) とすると目標姿勢角 θ_r は次式で示す。

$$\tan \theta_r = \frac{\partial y}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (10)$$

次に、式(9)の両辺を x で微分した式に式(10)を代入する。目標姿勢角 θ_r についてまとめると次式のように求めることができる。この目標姿勢角 θ_r は大域的な目標姿勢角とする。

$$\theta_r = \tan^{-1} \left(\frac{2y}{x} \right) \quad \dots\dots\dots (11)$$

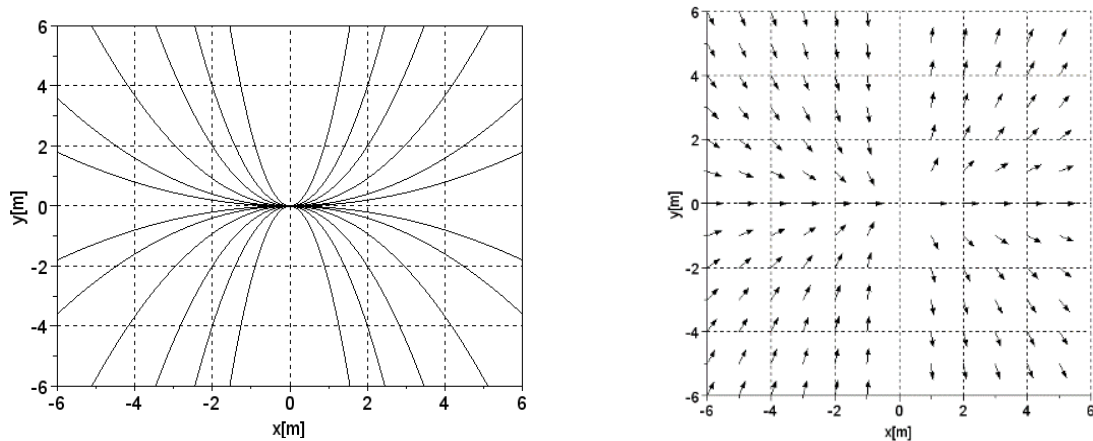


図 3 大域的な経路関数群と目標姿勢角

図3の左図は大域的な経路関数群、右図は大域的な目標姿勢角 θ_r をベクトルで表したものである。

2.4 局所的な直線経路追従の目標姿勢角^[2]

ここでは、四輪車両が溝を横断するときの手法について説明する。図4のように溝を横断するとき、溝に対して垂直に進入する場合と斜めに進入する場合の二通り考えられる。文献[6],[7]では溝の形状が段差の場合を検討しているが、車両が溝に対して垂直に進入する場合より斜めに進入する場合の方が横断しやすいことを理論的に考察している。しかし、ただ角度をつけて進入するだけでは横断の際にスリップや立ち往生する場合があるので、溝の幅や深さなどから適切な位置や進入角度に誘導する必要がある。ここでは、溝を通過する際に適切な位置や進入角度が与えられたときに、それに沿う直線経路を設定し、これに誘導することができる手法を提案する。

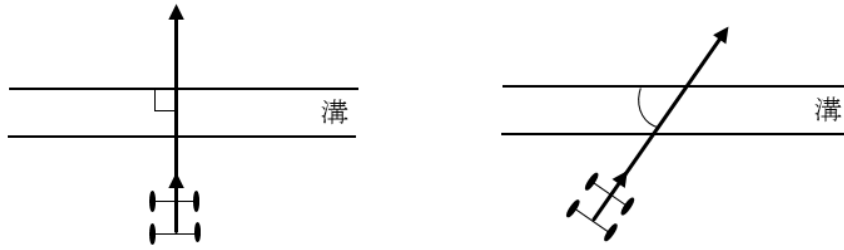


図4 溝に対して垂直に進入する場合(左図)と斜めに進入する場合(右図)

本手法における直線経路への誘導には文献[3]より提案された手法を用いる。これは追従させたい直線経路にある通路幅を持たせ、その通路幅の中に直線経路に収束する関数群を設定する。そして、この関数群の接線方向を車両の目標姿勢角とすることにより、目標とする直線経路に追従させる。この関数群は図5のようにシグモイド関数を用いて構築する。本研究では、原点収束制御中に溝を横断する問題を取り扱うので原点収束はグローバル座標系により行い、直線経路追従は溝の横断の際に設定するローカル座標系で考える。ローカル座標系における車両の位置を (x', y') とするとこの関数群は次式で表される。

$$y' = \frac{W}{1 + e^{ax+b}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

a は曲線の傾きを調整する正定数、 b は曲線の位置を平行移動する実数、 W は通路の半分の幅である。ここで、図6のように溝の目標通過位置を (x_c, y_c) 、 x 軸の負の向きと x' 軸のなす角を目標進入姿勢角 α とし、ローカル座標系とグローバル座標系との関係式は次式に示す。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(-\alpha) & -\sin(-\alpha) \\ \sin(-\alpha) & \cos(-\alpha) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_c \\ y - y_c \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (13)$$

次に、式(10)の変数を $(x, y) = (x', y')$ 、 $\theta_r = \theta_g$ とすると目標姿勢角 θ_g は次式で表される。

$$\tan \theta_g = \frac{\partial y'}{\partial x'} \quad \dots\dots\dots (14)$$

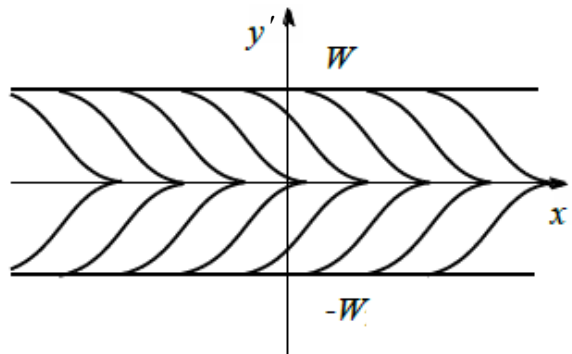


図5 直線経路関数群

式(12)の両辺を x' で微分した式に式(13)を代入する。目標姿勢角 θ_g についてまとめると次式のように求め

ることができる。この目標姿勢角 θ_g は局所的な目標姿勢角とする。

$$\theta_g = \tan^{-1}\left(\frac{a}{W} y'(W - |y'|)\right) + \alpha \quad \dots\dots\dots (15)$$

図7は局所的な目標姿勢角 θ_g をベクトルで表したもので、赤の一点鎖線が追従したい経路である。

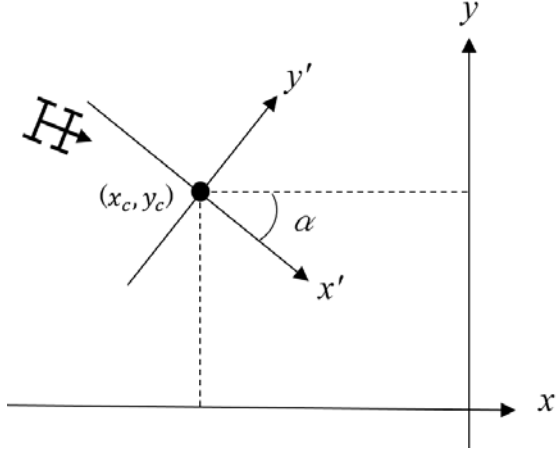


図6 グローバル座標系とローカル座標系

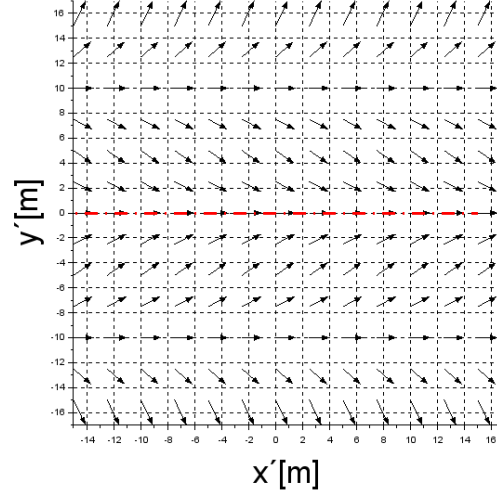


図7 直線経路関数群の目標姿勢角 θ_g , $W=10$

2.5 溝を考慮した PGR の目標姿勢角

PGR の特徴は車両の追従すべき目標姿勢角を状況に合わせて変更できる点である。本手法では、大域的な原点収束の目標姿勢角から溝近傍で局所的な直線経路追従の目標姿勢角に変更することで溝を通過する手法を提案する。しかし、ただ目標姿勢角を変更するだけでは図8のように急激なベクトル変化となってしまう、無理な操舵をとる恐れがある。よって、連続的に接続するために重み関数を導入する。

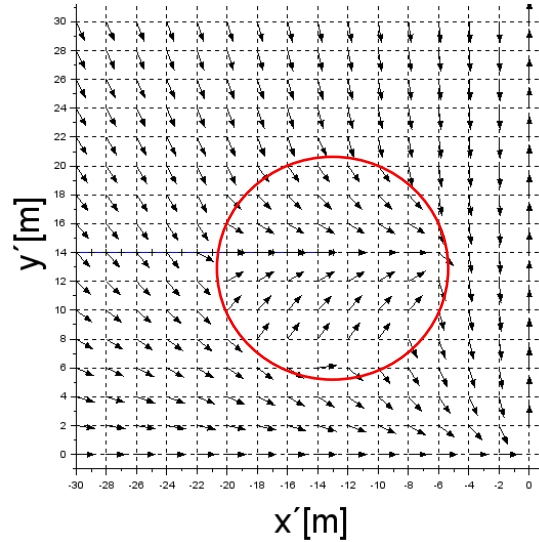


図8 重み関数無しの場合、赤丸内が直線経路追従、赤丸外が原点収束

溝近傍の目標姿勢角と大域的な目標姿勢角を連続的に接続するために、次のような重み関数 m_t を定義する。図9は L_c と m_t の関係グラフである。

$$m_t = \frac{1}{1 + \exp\{-d(L_c - c) - qi\}} \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$L_c = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} \quad \dots\dots\dots (17)$$

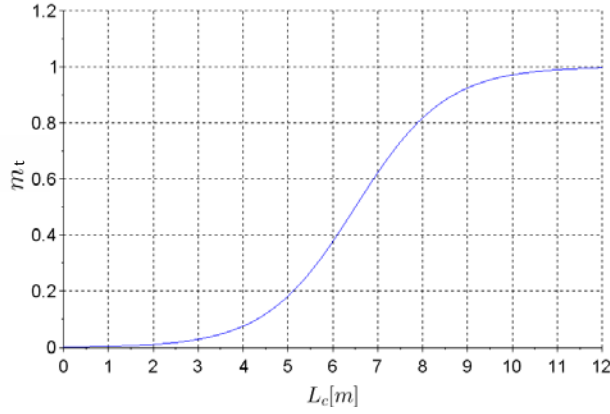
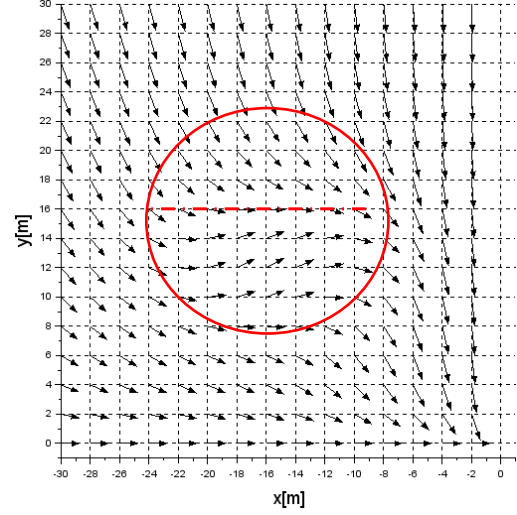

 図 9 L_c と m_t の関係グラフ


図 10 直線経路関数群

ここで d, c は正の定数、 L_c は車両と目標通過位置との距離である。 q は溝通過前を 0、通過後を 1 とし、 i の値により通過後の重みを調整する。重み関数 m_t の値は車両と目標通過位置との距離に応じて、 $0 \sim 1$ の間で変化する。重み関数 m_t を用いて式(11)、(15)を足し合わせた次式が、溝を考慮した際の目標姿勢角となる。

$$\theta_f = (1 - m_t)\theta_g + m_t\theta_r \quad \dots\dots\dots (18)$$

この式は目標通過位置との距離に応じて連続的に θ_r から θ_g に変化する。図 10 は θ_f をベクトルで表したものである。

2.6 溝を考慮した PGR の指令値

PGR の姿勢角制御に対応している操舵角指令値 u_2 は式(5)を基にして次式が得られる。

$$u_2 = \tan^{-1} \left[-\frac{L\lambda}{u_1} (\theta - \theta_f) + \frac{\partial \theta_f}{\partial x} L \cos \theta + \frac{\partial \theta_f}{\partial y} L \sin \theta \right] \quad \dots\dots\dots (19)$$

ここで、 θ_f では x, y の両方を変数として使用しているため、式(9)を偏微分すると次式となる。

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial x} = \frac{\partial \theta_g}{\partial x} (1 - m_t) + \frac{\partial \theta_r}{\partial x} m_t \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial y} = \frac{\partial \theta_g}{\partial y} (1 - m_t) + \frac{\partial \theta_r}{\partial y} m_t \quad \dots\dots\dots (21)$$

各項について解いた後にまとめると、溝を考慮した PGR の操舵角指令値は次式で定義される。

$$u_2 = \tan^{-1} \left[-\frac{L\lambda}{u_1} (\theta - (1 - m_t)\theta_g - m_t\theta_r) + \frac{(-aW \sin(-\alpha)(W - 2|y'|)(x^2 + 4y^2) - 2ym_tW^2 + 2ym_t a^2 y'^2 (W - |y'|)^2) L \cos \theta}{(W^2 + a^2 y'^2 (W - |y'|)^2)(x^2 + 4y^2)} + \frac{(-aW \cos(-\alpha)(W - 2|y'|)(x^2 + 4y^2) - 2xm_tW^2 + 2xm_t a^2 y'^2 (W - |y'|)^2) L \sin \theta}{(W^2 + a^2 y'^2 (W - |y'|)^2)(x^2 + 4y^2)} \right] \quad \dots\dots\dots (22)$$

車速指令値は大域的な PGR と局所的な PGR で変更する。文献[2]より、大域的な PGR の車速指令値 u_{1r} は式(8)を用いる。

$$u_{1r} = -\lambda_1 x \cos \theta - \lambda_2 y \sin \theta \quad \dots\dots\dots (23)$$

次に、局所的な PGR の車速指令値 u_{1g} は x 軸 $((y, \delta) = (0, 0))$ が漸近安定となるように設定する。文献[3]より、局所的な PGR の車速指令値 u_{1g} は次式を用いる。

$$u_{1g} = -(1 - K_m e^{-c_m y^2}) \frac{1 - e^{-c_y \sin \theta}}{1 + e^{-c_y \sin \theta}} V_m + K_m e^{-c_m y^2} V_m \quad \dots\dots\dots (24)$$

u_{1g} の第一項目がリアプノフ安定性を重視する制御則、第二項目は前進を重視する制御則である。 V_m は速度の上限を示す。どちらかを重視するのかを $K_m e^{-c_m y^2}$ の値を変更することにより調整することができる。

ただ変更するだけでは切り替え時に急激な速度変化が起こり、車両制御に影響を及ぼす可能性がある。よって、切り替え時に次式のような重み関数を導入する。

$$m_{u_1} = \frac{1}{1 + \exp\{-d_u(L_c - c_u)\}} \quad \dots\dots\dots (25)$$

ここで、 d_u と c_u は任意の定数とする。車速指令値 u_1 は次式のように表せる。

$$u_1 = (1 - m_u)u_{1r} + m_u u_{1g} \quad \dots\dots\dots (26)$$



図 11 四輪車両

3 実験

提案手法が実機でも有効にはたらくかを実験により検証する。シミュレーション結果も同時に示し、実環境の影響についても考察する。

3.1 内容

実験時に使用する四輪車両は図 11 に示す市販されている ATV に機材を取り付けた車両である。実験場所は、草が生い茂った未舗装で所々凹凸のある広いフィールドである。初期位置は $(x, y, \theta) = (-35, 20, 0)$ とし、原点 $(0, 0)$ まで走行させる。尚、初期位置の設定はスケールにより距離を測って設定する。溝の数は1つとし、その位置をスケールと GPS によって測定し、グローバル座標系において溝を表す直線の式 $y = 0.5x + 24$ を求めた。この直線上に目標通過位置 $(x_c, y_c) = (-16, 16)$ を設定する。目標進入姿勢角 α は 0 度、-20 度、-40 度、-60 度の場合で実験を行う。試行回数は各 3 回行う。最高速度は安全性を考慮して u_{1r} が 5[km/h]、 u_{1g} が 3[km/h]と設定する。

表 1 制御則パラメータ

L	λ	λ_1	λ_2	a	b	c	W	d_u	c_u
1.27	1.0	0.1	0.1	0.2	0.5	15	20	0.5	12

3.2 結果

実験結果を図 12～15 に示す。左図が x - y 軸の車両軌跡を示す。橙色の実線が実機の走行軌跡、青色の点線がシミュレーションの走行軌跡、黒点が目標通過位置、赤線が溝の線、黒の一点鎖点が追従したい直線経路である。位置座標は GPS によって取得しているが、初期位置はスケールによって計測して設定

したため、若干の違いがある。シミュレーションの初期位置は実験で GPS にて計測した値に合わせてある。右図は時間と車両姿勢角の関係を示すグラフである。青の細線が大域的な PGR 制御、赤の太線が局所的な PGR 制御、縦軸黒線は車両が溝の線を横断した時刻、横軸黒線は車両が目標進入角度 α を示す。下図は操舵角の時間応答のグラフである。青線が操舵指令値、緑線が実測値である。

3.3 考察

溝を通過する際に車両が目標進入姿勢角と目標通過位置で溝を通過できているかを考察する。図 12 より $\alpha=0$ では、車両は直線経路を追従しながら目標進入姿勢角で目標進入位置を通過し、その後原点に収束していることが確認できる。図 13 より $\alpha=-20$ では、目標通過位置において車両が目標進入姿勢角となっていないが、目標通過位置を通過し、その後原点に収束していることが確認できる。図 13 の姿勢角のグラフより、17 秒付近から目標進入姿勢角の -20 度に徐々に近づいており、24 秒以降も直線経路追従を続ければ目標進入姿勢角に到達できていたと考えられる。さらに、図 13, 14 より $\alpha=-40, -60$ では、最終的に原点には収束できているが、溝の目標通過位置に到達した時点で、まだ直線経路追従が完了しておらず、結果として目標通過位置を通過できていない。大域的な目標姿勢角から局所的な直線経路追従の目標姿勢角に切り替わるときの車両の姿勢角と目標進入姿勢角の偏差が大きいほど、直線経路に達するまでの時間を要し、目標通過位置を通過できていないことが確認できる。例えば、直線経路追従制御に移るタイミングをもう少し早くするため、直線経路追従のための関数群として採用した式(12)の a のパラメータを大きくし、シグモイド関数の傾きを大きくすることにより改善が期待できる。ただし、文献[8]より a を上げすぎると x 軸周辺の操舵変化が大きくなり、オーバーシュートの原因となるので適切な調整が必要である。そのほか、直線経路追従に早く移行するため、式(16)で表される重み関数の中の c の値を大きくして、 θ_f における θ_g の影響範囲を広くすることができる。このようにして、溝通過のための目標進入姿勢角と目標通過位置をパラメータによって調整することが可能となる。

次にシミュレーションとの比較を行う。図 12~15 より、全ての実機走行軌跡はシミュレーションの走行軌跡に比べて軌跡が少し膨らんでいるのが確認できる。これは、シミュレーションでは車両の操舵角が操舵角指令値 u_2 に遅れがなく追従することを前提にしていたが、実際の装置では図 12~15 の操舵角の時間応答に示すとおり、応答に遅れが生じている。この遅れは、操舵装置や駆動装置の動特性、さらにはタイヤと地面の間にはたらく摩擦、地形の起伏などによる操舵抵抗によるものと考えられる。これらが原因となり操舵角制御に影響を与え、実験とシミュレーションの軌跡に違いがでたと考えられる。

4 結言

本稿では、車両にてフィールド調査を行うときに、目的地に向かう途中で排水溝などの直線的な溝を横断する問題を扱った。大域的には原点に収束し、溝に接近し通過する際には、局所的に指定の進入角度をもつ直線経路に追従させる文献[5]の手法を採用し、実機において実証実験を行い、次の結論を得た。1つ目は、 α が小さい場合には、当初の意図通り制御則が機能することが確認できたことである。2つ目は、 α が大きい場合、大域的な原点収束動作から局所的な直線経路追従に切り替わるときに、現在の車両姿勢角と目標進入姿勢角の偏差が大きいほど、直線経路に達するのに時間を要し、直線経路に到達する前に溝に到達してしまう現象を確認したことである。直線経路は溝の横断に適した場所を通るように設定してあるので、この現象が生じると、例えば通過に危険がある位置で溝を横断する場合がある。これを避けるため、切り替え時の姿勢角偏差を小さくするように直線経路を設定すること、制御則中のパラメータ a や c を調整する方策も提案した。3つ目は、操舵装置や駆動装置の動特性、タイヤと地面の間にはたらく摩擦、地形の起伏などによる操舵抵抗により、実機の操舵角の応答には目標値に対して遅れが生じることを確認したことである。この遅れは、直線経路への追従特性にも影響するため、先と同様の方策が必要であろう。

本稿では溝が既知の場合を取り上げたが、溝が未知の状態にも対応できるように、今後はリアルタイムでの溝検出をする手法も考えていくことが課題である。

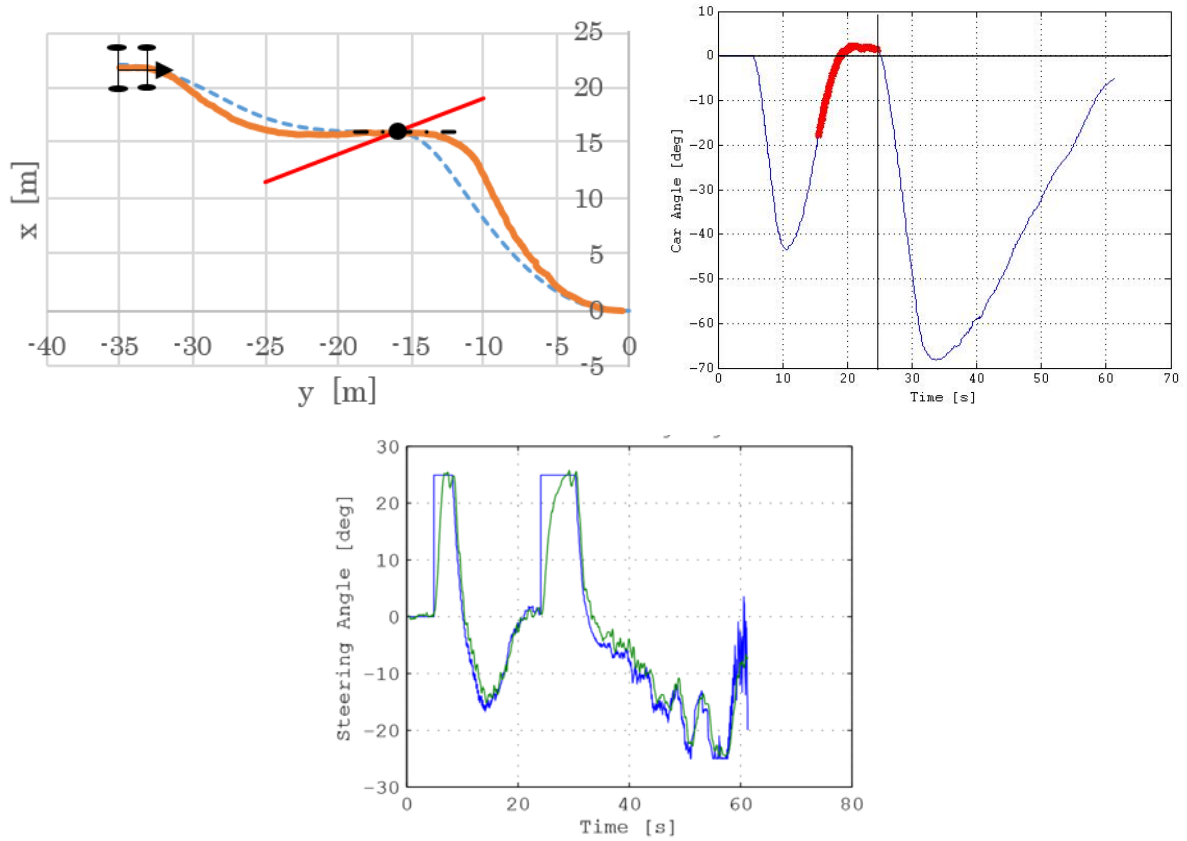


図 12 $\alpha=0$ 度（左図：車両軌跡，右図：時間と車両姿勢角，下図：時間と操舵角変化）

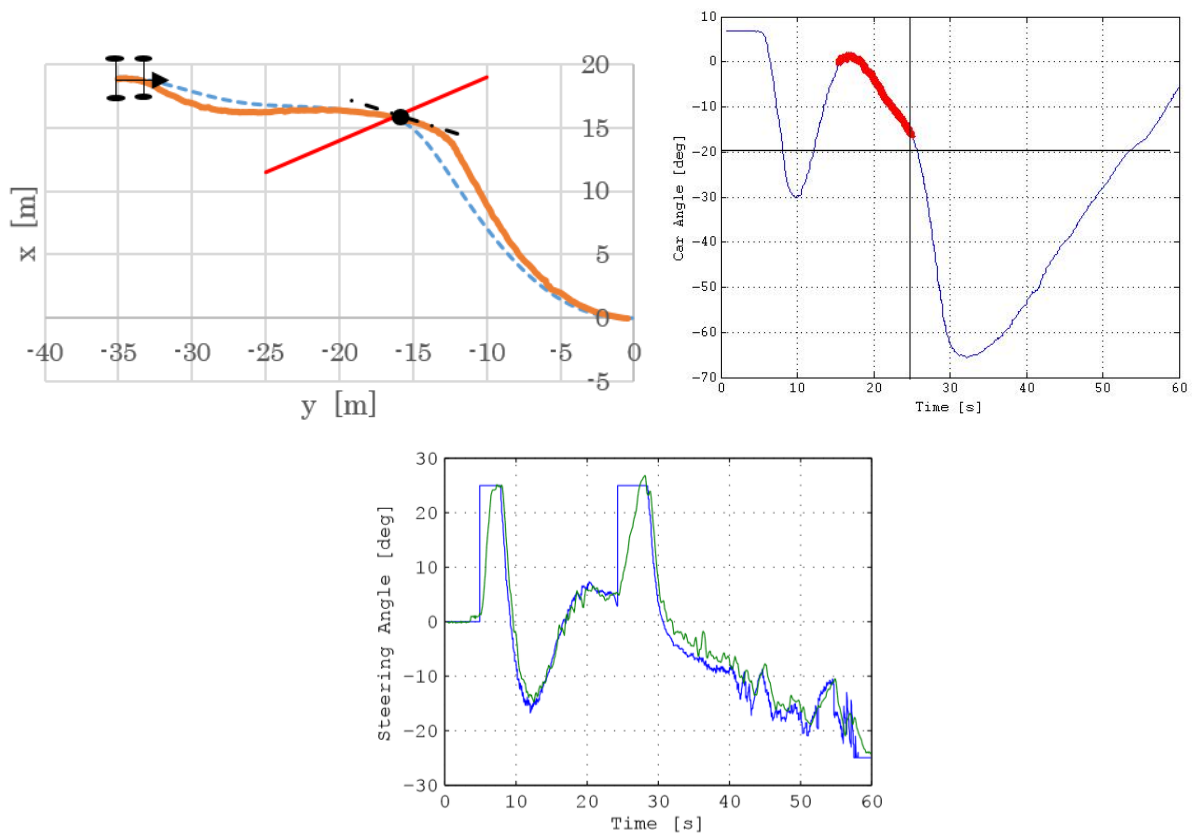


図 13 $\alpha=-20$ 度（左図：車両軌跡，右図：時間と車両姿勢角，下図：時間と操舵角変化）

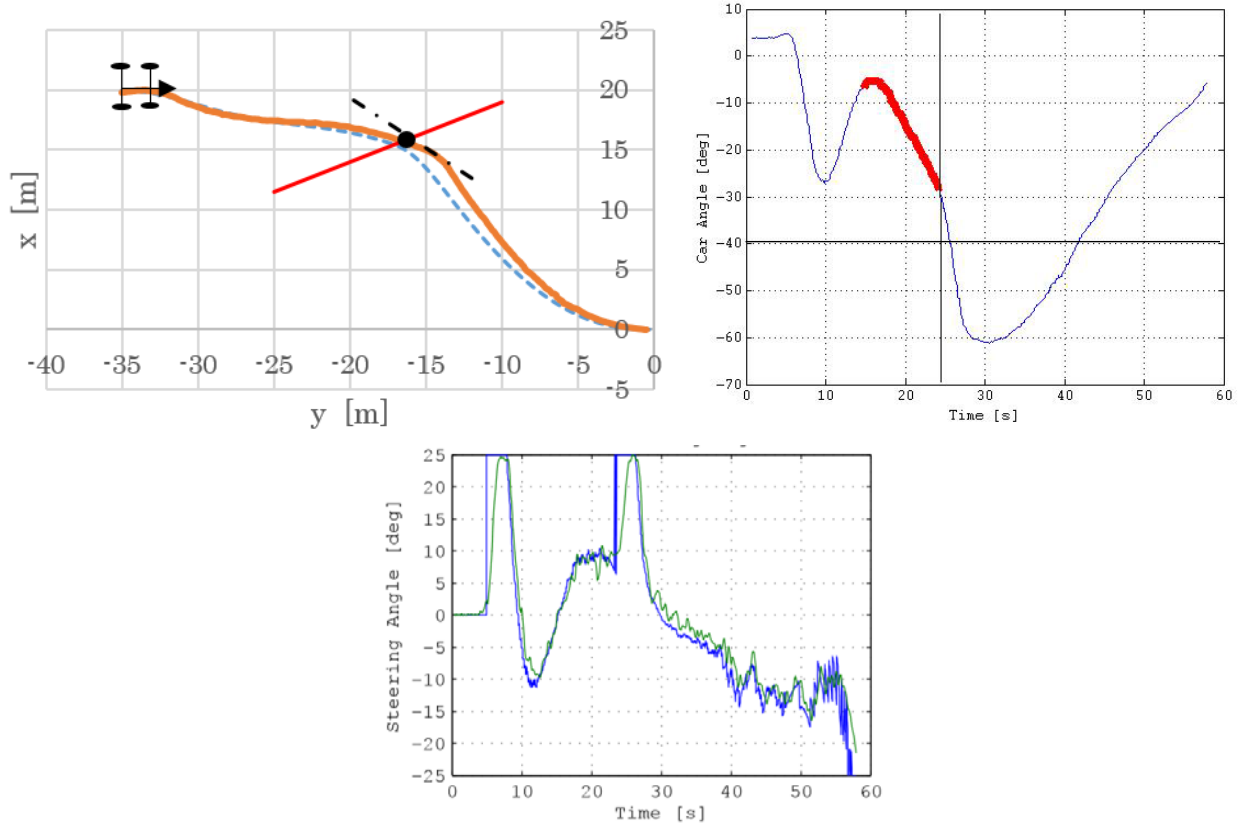


図 14 $\alpha = -40$ 度 (左図：車両軌跡, 右図：時間と車両姿勢角, 下図：時間と操舵角変化)

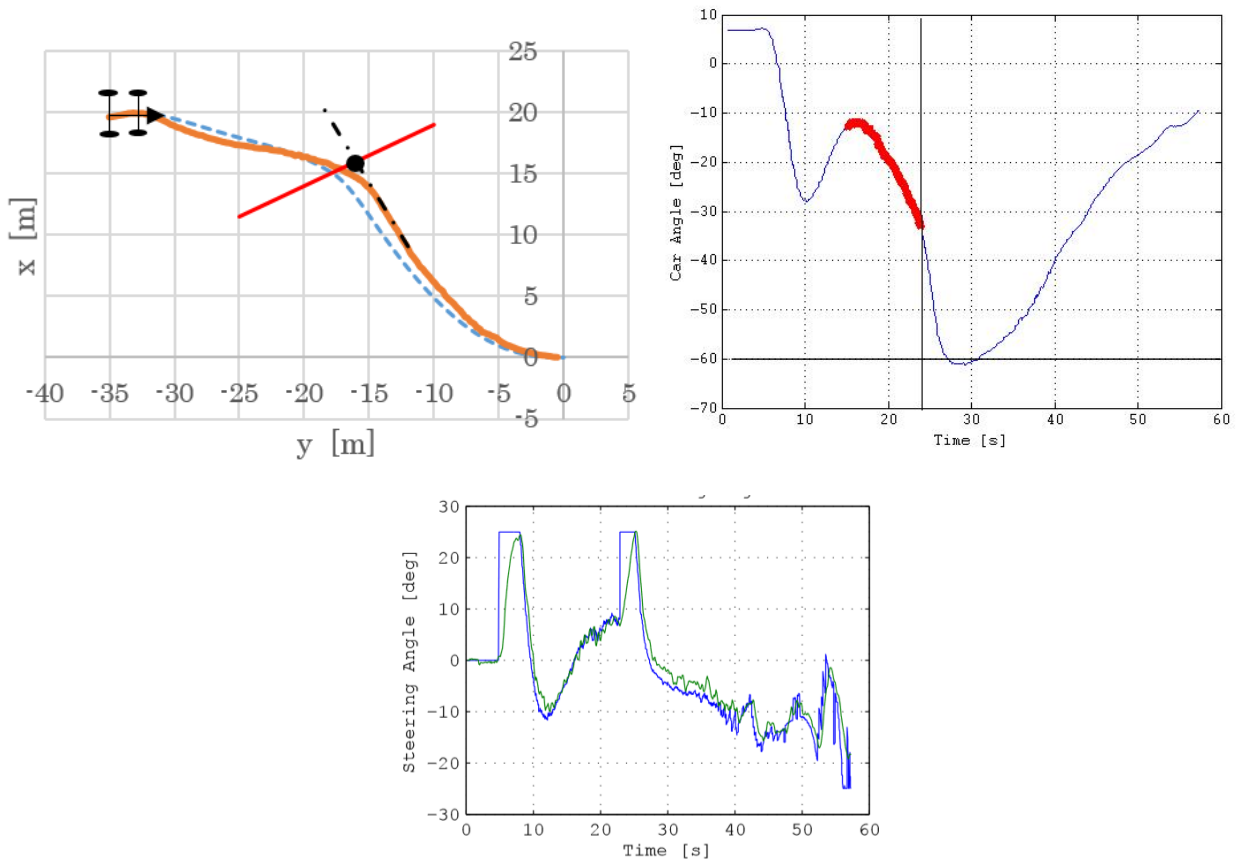


図 15 $\alpha = -60$ 度 (左図：車両軌跡, 右図：時間と車両姿勢角, 下図：時間と操舵角変化)

謝辞

本研究の実施に際し、室蘭工業大学環境科学・防災研究センターのご支援をいただきました。さらに、スズキ株式会社様には本研究の実施に欠かせない四輪車両を貸与して頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 高島昭彦, 他: “経路生成形レギュレータによる非ホロノミック車両のフィードバック制御”, 日本機械学会論文集(C編), vol. 70, no. 689, p. 120-126, 2004.
- [2] 樽海靖孝, 他: “経路生成形レギュレータによる四輪車両の走行制御”, 日本機械学会論文集(C編), vol. 79, no. 801, p. 1693-1708, 2013.
- [3] N. HANAJIMA, B. YANG, W. LUO, J. DAI and A. TAKASHIMA: “Path-generating regulator along a straight passage for car-like robots”, Proc. of 12th Int. Con. on Motion and Vibration Control (MOVIC 2014), (2014), 1B15, 12 pages.
- [4] 淡路承吾, 他: “経路生成形レギュレータによる直線形状障害物回避に関する研究”, 第 45 回学生員卒業研究発表講演, p. 292-293, 2016.
- [5] 平岡圭介, 他: “四輪型車両における溝への進入角度を考慮した経路生成形レギュレータ”, ロボティクス・メカトロニクス論文集, P160, 2A2-06b7, 2016.
- [6] 池田毅, 他: “段差乗越え時の接触点における滑りを考慮した車輪モデル”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, p. "1P1-E11", 2012.
- [7] 池田毅, 他: “進入角度による段差の乗り越えやすさを考慮した車輪モデル”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, p. "2P1-F12(1)"-"2P1-F12(4)", 2010.
- [8] 羅威: “経路生成形レギュレータによる四輪型車両の直線・円弧追従”, 第 47 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会論文集, vol. 47, p. 21-22, 2015.
- [9] Yang B., Hanajima N., Yamamoto A., Ayamura M., Jun Dai: “Path-generating regulator along a straight passage for two-wheeled mobile robots”, Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on, p. 4837-4844, 2013.